

## 論文 腐食発生限界塩化物イオン濃度に及ぼすコンクリート配合の影響

堀口 賢一<sup>\*1</sup>・丸屋 剛<sup>\*2</sup>・武若 耕司<sup>\*3</sup>

**要旨：**コンクリートに埋設した鋼材の自然電位の経時変化から腐食の発生を推定し、その時点におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度を測定することにより、水セメント比ごとの腐食発生限界塩化物イオン濃度を求めた。その結果、普通ポルトランドセメントの水セメント比 65, 55, 45%の供試体における腐食発生限界塩化物イオン濃度は、複数の供試体の測定結果から算定した平均区間推定（信頼係数 95%）の最小値をとった場合に 1.6, 2.5, 3.0kg/m<sup>3</sup> となり、水セメント比により腐食発生限界塩化物イオン濃度が異なることが確かめられた。

**キーワード：**コンクリート, 腐食発生限界塩化物イオン濃度, 水セメント比, 自然電位

## 1. はじめに

塩害に対する耐久性を考慮する必要がある鉄筋コンクリート構造物においては、鋼材の腐食発生までの期間である潜伏期の長さを予測することが重要である。そのためには、鋼材の腐食が発生する時点を判断する必要があるが、現状では鋼材位置の塩化物イオン濃度が 1.2kg/m<sup>3</sup> に達する時点で腐食が開始するとする考えが一般的<sup>1)</sup>である。この考えによると、使用するコンクリートの水セメント比や単位セメント量などの配合条件によらず、腐食発生限界塩化物イオン濃度が一律であるため、例えば低い水セメント比のコンクリートを使用するとしても、塩害に対する耐久性を確保するためには、大きなかぶりが必要になる場合がある。

ところで、腐食発生限界塩化物イオン濃度は、コンクリート中に浸透した塩化物イオンがセメント水和物へ固定化される<sup>2)</sup>程度などにより変わると考えられ、配合に依存する可能性がある。塩害に対する合理的な耐久性設計を行うためにも、使用するコンクリートの配合などに応じた腐食発生限界塩化物イオン濃度を設定する必要があり、本研究はこれを実験により評価することを目的とした。

## 2. 実験内容

## 2.1 実験概要

腐食発生限界塩化物イオン濃度を測定するためには、コンクリート中の鋼材の腐食発生時点を正確にとらえなくてはならない。筆者らは、既往の研究<sup>3)</sup>で鋼材の腐食発生時点を、コンクリート中に埋設した照合電極の連続モニタリングにより判断できることを明らかにしている。

本研究でもこの測定手法を用いて鋼材の腐食発生時点を判断し、解体して鉄筋の腐食状況を目視で確認して、コンクリート中の塩化物イオン濃度の深さ方向への分布を測定した。

## 2.2 供試体

図-1に供試体の形状・寸法を示す。また、図-2に供試体の断面を示す。供試体寸法は 100×100×400mm で、粗骨材最大寸法は 13mm、鉄筋は SD 295A の D19 をかぶり 20mm と 25mm で 2 本配置した。また、供試体中央に鉛照合電極を 1 本配置した。供試体の打設方向は、コンクリートと鉄筋界面のブリーディングなどの影響を極力避けるため、長さ 400mm 方向に縦打ちとした。

表-1に供試体の配合と初期含有塩化物イオン濃度を示す。セメントは普通ポルトランドセメントで、水セメント比は 65, 55, 45%の 3 種

\*1 大成建設（株） 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室副主任研究員 工修（正会員）

\*2 大成建設（株） 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室主席研究員 工博（正会員）

\*3 鹿児島大学 海洋土木工学科教授 工博（正会員）

表－1 供試体の配合と初期含有塩化物イオン濃度

| 供試体<br>記号 | Gmax<br>mm | スランプ<br>cm | 空気量<br>% | 水セメント比<br>% | s/a<br>% | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |     |     |      | 初期含有塩化物<br>イオン濃度 (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----------|------------|------------|----------|-------------|----------|--------------------------|------|-----|-----|------|---------------------------------------|
|           |            |            |          |             |          | 水                        | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | 混和剤  |                                       |
| 65N       | 13         | 12.0       | 5.2      | 65          | 52       | 165                      | 254  | 974 | 904 | 2.55 | 0.04 (No. 65N-5)                      |
| 55N       |            | 11.0       | 5.0      | 55          | 50       | 160                      | 291  | 929 | 933 | 2.90 | 0.05 (No. 55N-5)                      |
| 45N       |            | 11.5       | 4.0      | 45          | 48       | 163                      | 362  | 858 | 933 | 3.63 | 0.10 (No. 45N-5)                      |

類とした。細骨材は山砂（表乾密度2.59g/cm<sup>3</sup>，吸水率2.15％），粗骨材は碎石（表乾密度2.67g/cm<sup>3</sup>，吸水率0.74％）を使用した。

28 日標準養生後の圧縮強度

は，水セメント比 65％で 28.1N/mm<sup>2</sup>，55％で 39.9N/mm<sup>2</sup>，45％で 49.7N/mm<sup>2</sup>であった。また，初期含有塩化物イオン濃度は，0.04～0.10kg/m<sup>3</sup>であった。

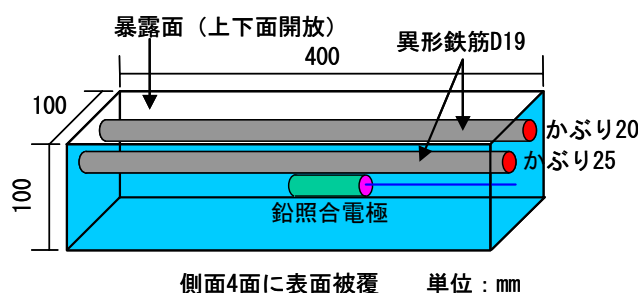
供試体は水セメント比 65，55％を 7 体（供試体 No.65N-1～No.65N-7，供試体 No.55N-1～No.55N-7），45％を 6 体（供試体 No.45N-1～No.45N-6）製作し，28 日間標準養生後に，側面 4 面にエポキシ樹脂系表面被覆を塗布し，7 日間乾燥後に実験に供した。側面 4 面に表面被覆を塗布したのは，供試体側面からの水の蒸発を抑止するためである。

## 2.3 実験方法

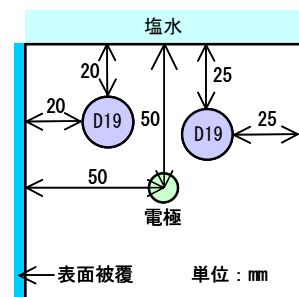
### (1) 塩分浸透

図－3 に塩分浸透方法を示す。コンクリート供試体中に埋設した鉄筋の腐食を，照合電極近傍に限定的に発生させるために，供試体表面からの塩水（10％塩化ナトリウム溶液）の供給範囲を，幅（短辺方向）100mm×長さ（長辺方向）50mm の範囲とした。供試体表面に角形プラスチック容器（塩分供給セル）を乗せ，その中を塩水で満たし，照合電極近傍のコンクリート表面から塩化物イオンが供給されるようにした。

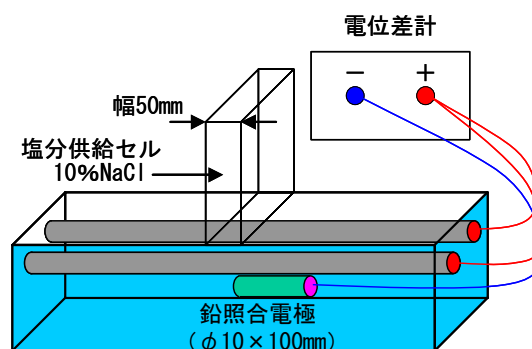
なお，供試体は風雨や日射の影響はないが，



図－1 供試体の形状・寸法



図－2 供試体の断面



図－3 塩分浸透・自然電位測定方法

外気の温度や湿度の影響を受ける屋内環境に静置した。

### (2) 自然電位計測

図－3 に自然電位の計測方法を示す。計測にはコンクリート内部に埋設した鉛照合電極を用い，鉄筋の腐食発生時点を適確にとらえるため，自然電位を 10 分間隔で連続的にモニタリングした。

### (3) 腐食状況確認

供試体の解体時期は，自然電位が定常状態より卑になった時点とした。腐食状態の確認は，供試体を割裂して鉄筋を取り出し，目視で行った。また，腐食範囲をトレーシングペーパーに写し取り，プラニメータを用いて腐食面積を測定した。

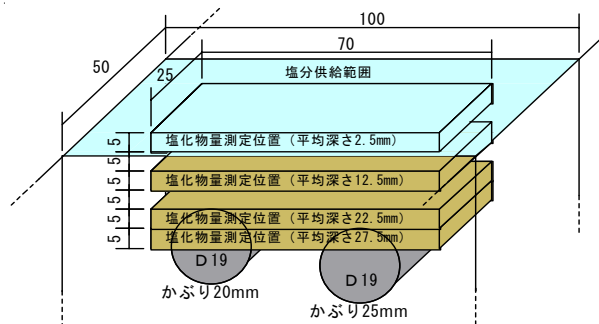


図-4 塩化物イオン濃度の測定位置

#### (4) 塩化物イオン濃度測定

図-4 に塩化物イオン濃度の測定位置を示す。塩化物イオンの測定位置は、塩水を接触させた幅 100mm×長さ 50mm の範囲の直下とした。切出すスライス片は幅（短辺方向）70mm×長さ（長辺方向）25mm×厚さ（深さ方向）5mm とし、深さ方向に 4 点もしくは 5 点で採取した。スライス片の採取深さは、供試体表面から 0～5mm（平均深さ 2.5mm）、10～15mm（平均深さ 12.5mm）、20～25mm（平均深さ 22.5mm）、25～30mm（平均深さ 27.5mm）の 4 点（5 点の場合はさらに 15～20mm（平均深さ 17.5mm））とした。なお、スライス片の長さ（長辺方向）25mm の範囲は、かぶり 20mm の鉄筋における腐食発生位置が含まれるように、供試体ごとに選定した。

塩化物イオン濃度の測定方法は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に従った。

### 3.実験結果

#### 3.1 自然電位

写真-1 に自然電位を連続的に計測している供試体の状況を示す。また、図-5 にコンクリート中に埋設した照合電極による自然電位の経時変化を示す。ここでは、鉛照合電極で測定した自然電位から 799mV を引いて、飽和硫酸銅電極（CSE）に対する自然電位に換算して表している。

水セメント比の違いによらず、全ての供試体でかぶり 20mm の鉄筋に腐食が発生したと思われる時点で、かぶり 20mm の鉄

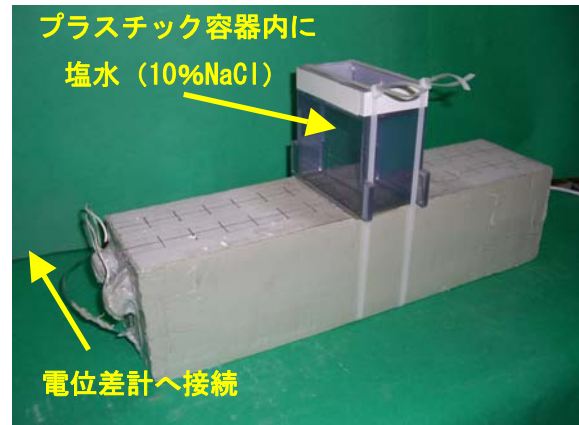


写真-1 自然電位連続計測時の供試体

筋の自然電位が急激に低下する現象が見られた。一方、同一供試体内に埋設したかぶり 25mm の鉄筋には自然電位の急激な低下は見られなかった。

#### 3.2 腐食発生状況

写真-2 にかぶり 20mm の鉄筋に発生した腐食の状況を示す。写真-2 は、水セメント比 45% の供試体（供試体 No.45N-2）の場合の腐食発生状況であるが、腐食の発生状況は供試体により変わらない。全供試体の腐食面積は、0.6～9.7mm<sup>2</sup> とともに小さく、異なる水セメント比の供試体間や、同一水セメント比の供試体間での腐食発生状況に違いは見られない。また、電位の急激な低下が見られなかった、かぶり 25mm の鉄筋に腐食は見られなかった。

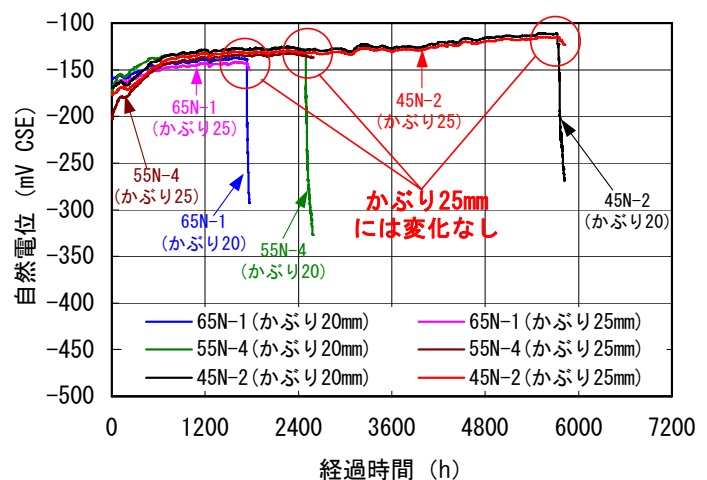


図-5 自然電位の経時変化



写真-2 腐食発生状況 (供試体 No. 45N-2)

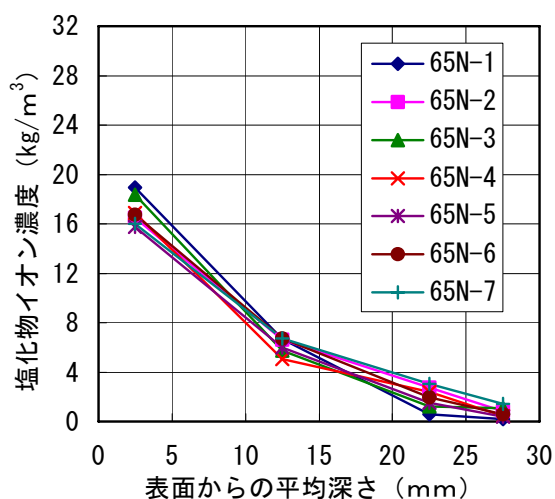


図-6 塩化物イオン濃度の分布  
(水セメント比 65%)

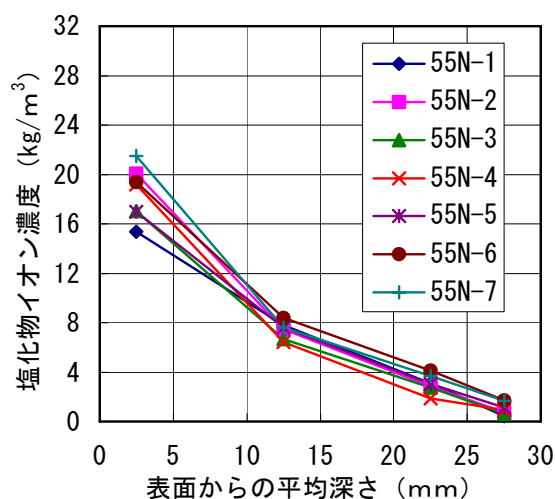


図-7 塩化物イオン濃度の分布  
(水セメント比 55%)

これらのことから、本測定手法における埋設電極の自然電位が低下した時点をも、腐食発生時点と評価してよいと考えられる。

### 3.3 塩化物イオン濃度

#### (1) 深さ方向への濃度分布

図-6～図-8 に塩化物イオン濃度の測定結果を示す。また、表-2 に自然電位低下までの時間と、電位低下から解体までの時間を示す。この測定結果は、自然電位が低下してから解体までの時間が1時間～136時間経過したときのものであり、腐食が発生したと考えられる自然電位が急激に低下を開始した時点のものではない。そのため、自然電位が低下した時点のかぶり 20mm 位置での塩化物イオン濃度（即ち腐食発生限界塩化物イオン濃度）を、この分布から計算により求める。計算は、塩化物イオン濃度の深さ方向への実測値から、表面における塩化物イオン濃度（以下、表面塩分量） $C_0$  および見掛けの拡散係数  $D$  を算出し、これらから腐食発生限界塩

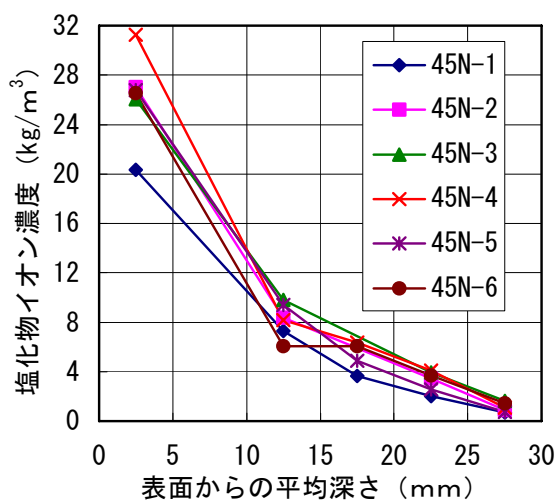


図-8 塩化物イオン濃度の分布  
(水セメント比 45%)

化物イオン濃度を求めた。

#### (2) 表面塩分量および見掛けの拡散係数

図-6～図-8 の分布から、式 (1) に示すフィックの拡散方程式における、表面塩分量  $C_0$  および見掛けの拡散係数  $D$  を最小二乗法により算出

した。なお、実験開始から自然電位低下までの時間に比べ、自然電位低下から供試体解体までの時間は短いため、 $C_0$  および  $D$  の時間依存性は考慮していない。

表-2 に各供試体の表面塩分量  $C_0$  および見掛けの拡散係数  $D$  を示す。また、これらの値から算出した、自然電位が低下した時点のかぶり 20mm 位置での塩化物イオン濃度もあわせて示す。ここで示す塩化物イオン濃度は、計算上の腐食発生限界塩化物イオン濃度である。

$$C(x,t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (1)$$

$C(x,t)$  : 深さ  $x$  (cm), 時刻  $t$  (年) における塩化物イオン濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$C_0$  : 表面における塩化物イオン濃度 (表面塩分量) ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$D$  : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )

$\operatorname{erf}$  : 誤差関数

### (3) 腐食発生限界塩化物イオン濃度

表-3, 図-9, 図-10 に腐食発生限界塩化物イオン濃度を示す。表-3 は、計算上の腐食発生限界塩化物イオン濃度の最小値, 平均値, 最大値と, これらを統計処理して求めた平均区間推

表-2 表面塩分量と見かけの拡散係数

| 供試体 No. | 電位低下までの時間 (h) | 電位低下から解体までの時間 (h) | 表面塩分量 $C_0$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) | 拡散係数 $D$ ( $\text{cm}^2/\text{年}$ ) | 腐食発生限界塩化物イオン濃度 (計算値) ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) |
|---------|---------------|-------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 65N-1   | 1737          | 29                | 24.9                                   | 2.62                                | 1.24                                            |
| 65N-2   | 1902          | 32                | 19.4                                   | 4.43                                | 2.90                                            |
| 65N-3   | 1546          | 53                | 20.6                                   | 4.52                                | 2.33                                            |
| 65N-4   | 1864          | 46                | 20.4                                   | 3.48                                | 2.05                                            |
| 65N-5   | 1535          | 64                | 19.2                                   | 4.08                                | 1.81                                            |
| 65N-6   | 1463          | 136               | 20.0                                   | 4.63                                | 2.16                                            |
| 65N-7   | 1778          | 14                | 17.8                                   | 6.00                                | 3.56                                            |
| 55N-1   | 2673          | 77                | 21.8                                   | 2.55                                | 2.37                                            |
| 55N-2   | 2823          | 95                | 24.0                                   | 2.57                                | 2.88                                            |
| 55N-3   | 2563          | 19                | 20.8                                   | 2.98                                | 2.70                                            |
| 55N-4   | 2491          | 91                | 21.6                                   | 2.95                                | 2.65                                            |
| 55N-5   | 2897          | 24                | 19.8                                   | 3.28                                | 3.46                                            |
| 55N-6   | 3003          | 11                | 21.8                                   | 3.68                                | 4.53                                            |
| 55N-7   | 3519          | 1                 | 23.5                                   | 2.84                                | 4.36                                            |
| 45N-1   | 5756          | 66                | 23.6                                   | 1.20                                | 2.63                                            |
| 45N-2   | 4881          | 55                | 31.1                                   | 1.47                                | 3.67                                            |
| 45N-3   | 5227          | 44                | 29.2                                   | 1.71                                | 4.72                                            |
| 45N-4   | 6375          | 71                | 35.3                                   | 1.12                                | 4.14                                            |
| 45N-5   | 5633          | 45                | 32.1                                   | 1.16                                | 3.26                                            |
| 45N-6   | 6321          | 29                | 29.0                                   | 1.25                                | 3.96                                            |

平均  
2.29

平均  
3.28

平均  
3.73

表-3 腐食発生限界塩化物イオン濃度

| 水セメント比 (%) | 単位セメント量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) | 腐食発生限界塩化物イオン濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) |      |      |                  |      |      |
|------------|------------------------------------|-------------------------------------------|------|------|------------------|------|------|
|            |                                    | 計算値                                       |      |      | 平均区間推定 (信頼係数95%) |      |      |
|            |                                    | 最小                                        | 平均   | 最大   | 標準偏差             | 最小   | 最大   |
| 65         | 254                                | 1.24                                      | 2.29 | 3.56 | 0.75             | 1.60 | 2.99 |
| 55         | 291                                | 2.37                                      | 3.28 | 4.53 | 0.86             | 2.48 | 4.08 |
| 45         | 362                                | 2.63                                      | 3.73 | 4.72 | 0.73             | 3.02 | 4.43 |

定 (信頼係数 95%) の最小値, 最大値である。この場合の平均区間推定の最小値は, 7 体もしくは 6 体の供試体による同一実験を 100 セット行った時に, 95 セットの平均がこの値以上となる

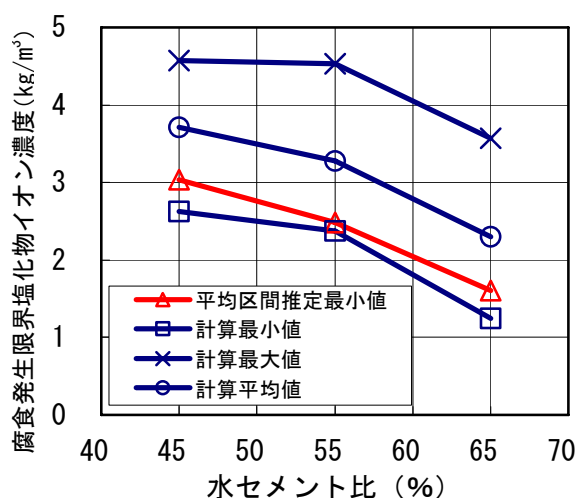


図-9 水セメント比と腐食発生限界塩化物イオン濃度の関係

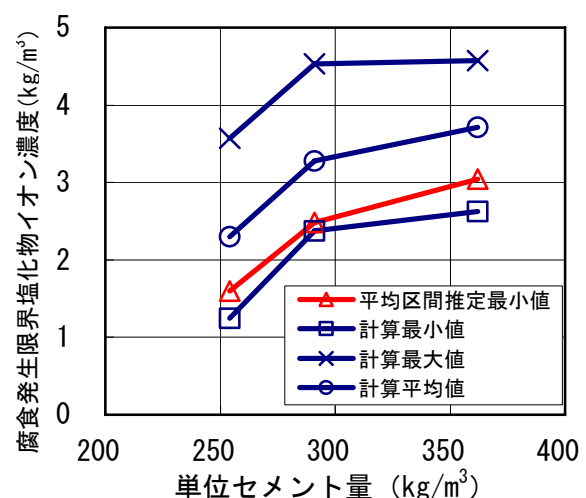


図-10 単位セメント量と腐食発生限界塩化物イオン濃度の関係

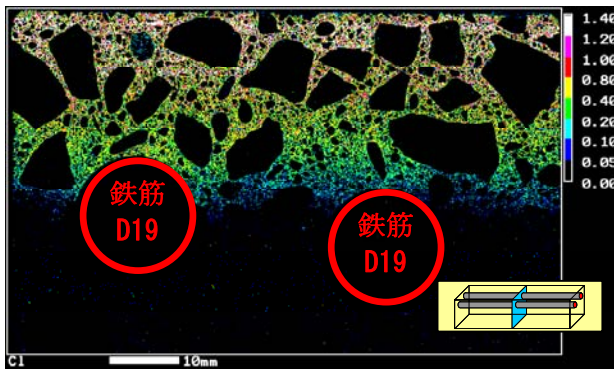


写真-3 EPMA画像（供試体中央横断面）

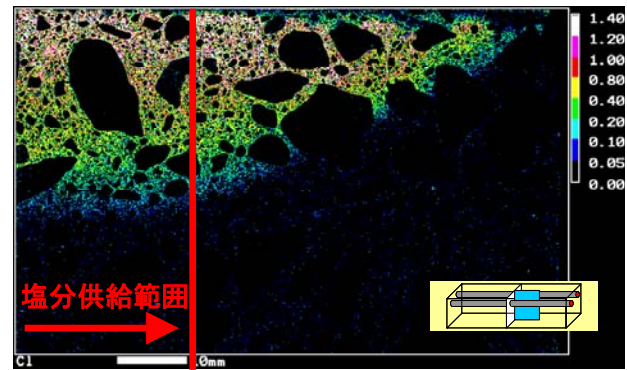


写真-4 EPMA画像（供試体中央縦断面）

閾値であり，ここではこの最小値を，腐食発生限界塩化物イオン濃度と考える。

図-9 は，水セメント比と腐食発生限界塩化物イオン濃度の関係を示したものである。平均区間推定（信頼係数 95%）の最小値をとった腐食発生限界塩化物イオン濃度は，水セメント比 65, 55, 45%でそれぞれ 1.6, 2.5, 3.0kg/m<sup>3</sup>である。

図-10 は，単位セメント量と腐食発生限界塩化物イオン濃度の関係を示したものである。セメントの単位質量に対する腐食発生限界塩化物イオン量の質量割合は，水セメント比 65, 55, 45%でそれぞれ 0.63, 0.85, 0.84 質量%である。

### 3.4 塩化物イオンの浸透

写真-3, 写真-4 に解体 15 日後の塩化物イオン浸透面の EPMA 画像を示す。写真-3 は水セメント比 65%の供試体（No.65N-2）の中央横断面（100×100mm の断面），写真-4 は同一供試体の中央から長辺方向への縦断面における測定結果である。これらの写真からわかるとおり，塩水を接触させている幅（短辺方向）100mm×長さ（長辺方向）50mm の範囲では，塩化物イオンがほぼ均等に浸透していることがわかる。

## 4.まとめ

本実験の結果，以下のことが明らかとなった。

- (1) 供試体内部に埋設した電極による自然電位の連続モニタリングにより，腐食発生時点を明確にとらえることができる。
- (2) 本実験における塩分の供給手法によれば，局所的に塩分をほぼ均等に浸透させることがで

きる。また，これにより腐食発生位置を限定することができる。

- (3) 腐食発生限界塩化物イオン濃度は，水セメント比や単位セメント量によって異なる。今回の実験条件における，普通ポルトランドセメントの平均区間推定（信頼係数 95%）の最小値をとった腐食発生限界塩化物イオン濃度は，水セメント比 65, 55, 45%でそれぞれ 1.6, 2.5, 3.0kg/m<sup>3</sup>であった。また，セメントの単位質量に対する腐食発生限界塩化物イオン量の質量割合は，0.63～0.85 質量%であった。

本実験は，（財）エンジニアリング振興協会における，「コンクリート構造物診断技術開発」の一環として実施した。また，EPMA 分析は太平洋セメント（株）中央研究所において実施していただいた。多大なる協力に謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 維持管理編，2001.1
- 2) 石田哲也，宮原茂禎，丸屋 剛：ポルトランドセメントおよび混和材を使用したモルタルの塩素固定化特性，土木学会論文集 E，Vol.63，No.1，pp.14-26，2007.1
- 3) 堀口賢一，丸屋 剛，武若耕司：自然電位連続モニタリングによる発錆時期推定手法の検討と腐食発生限界塩化物イオン濃度の測定，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1007-1012，2006.7